DOI:10.11931/guihaia.gxzw202310026

海南吊罗山濒危植物美丽火桐种群结构与动态特征

桂慧颖，方发之*，黎肇家，张晓凤，麦有专

（海南省林业科学研究院（海南省红树林研究院），海口 571100）

摘　要：美丽火桐（*Firmiana pulcherrima*）是中国特有种和国家 II 级重点保护野生植物，自然分布于海南中部热带雨林区。为摸清美丽火桐种群生存现状和发展趋势，探究导致其濒危的主要原因，该文对吊罗山美丽火桐天然种群进行了野外调查。以空间代替时间构建种群龄级结构，通过静态生命表、动态量化分析等方法分析该种群结构特征和动态变化规律，并采用时间序列模型预测种群未来发展潜力。结果表明：（1）美丽火桐种群为增长型种群，数量动态变化指数 $V_{pi}>V'_{pi}>0$，种群对完全随机干扰所承担的最大风险概率 $P_{\max}$ 为 1.82%，种群龄级结构完整，抗干扰能力弱，增长性和稳定性差。（2）该种群生命期望在第 II 龄级达到最大值，后随龄级增加而减小，死亡率和消失率均在第 I、VII 和 IX 龄级有峰值，存活曲线为 Deevey-III 型。（3）生存分析表明该种群具有早期锐减、中后期趋于稳定的特点。（4）经过未来 3 个、6 个、9 个龄级时间后，除第 IV 和第 VIII 龄级外，其余龄级个体数均有增多，种群自然更新良好。研究表明，强烈的光环境筛和种内种间竞争是导致吊罗山美丽火桐种群濒危的主要原因，建议采取适度间苗和修枝、强化种群及生境保护、积极开展人工繁育及回归种群扩充等措施，保育美丽火桐种群增长和促进种群恢复。

关键词：美丽火桐，种群结构，静态生命表，生存分析，时间序列预测

中图分类号：Q948.2　　　　　　　　　　**文献标识码**：A

Population structure and dynamic characteristics of endangered plant *Firmiana pulcherrima* in Diaoluo Mountain of Hainan Province

GUI Huiying, FANG Fazhi*, LI Zhaojia, ZHANG Xiaofeng, MAI Youzhuan

(*Hainan Academy of Forestry* (*Hainan Academy of Mangrove*), Haikou 571100, China)

Abstract: *Firmiana pulcherrima* is not only an endemic species in China but also a national grade second-level key protected plant. It is naturally distributed in the tropical rainforest area of central Hainan. To explore the survival status, development trend and the main reasons for its endangerment of the population, this paper conducted a field investigation on the natural population of *F. pulcherrima* in Diaoluo Mountain. The age-class structure of the population was constructed by replacing time with space. The population structure characteristics and dynamic change rules were analyzed through methods such as static life table and dynamic quantitative analysis, and the future development potential of the population was predicted by time series model. The results were as follows: (1) The population of *F. pulcherrima* was a growing type. The

---

基金项目：海南省属科研院所技术创新专项（SQKY2022-0038）；海南省院士工作站（林业）。

第一作者：桂慧颖（1993-），硕士，工程师，研究方向为林木生理生化及濒危植物保育，（E-mail）hnlkyghy@163.com

***通信作者**：方发之，副研究员，研究方向为珍稀濒危植物保护扩繁及退化生态系统修复，（E-mail）fangfazhi@126.com

number dynamic index of entire population structure when ignoring external interference V_{pi} is greater than the number dynamic index of entire population structure when considering external interference V'_{pi}, and both are greater than 0. The maximum risk probability of population to completely random disturbance $P_{\max}$ was 1.82%. The population has a complete age structure, weak anti-interference ability, poor growth and stability. (2)The life expectancy of the population reached the maximum at the second age class, and then decreased with the increase of age class. Mortality and vanish rates peaked at age I, VII and IX. The survival curve was Deevey-III type. (3)Survival analysis showed that the population decreased sharply in the early stage and tended to be stable in the mid-late stages. (4)After 3,6 and 9 age classes in the future, the number of individuals in the remaining age classes increased except for the IV and VIII age classes. The population has strong natural regeneration ability. Consequently, strong light environment screening and interspecific competition are the main reasons for the endangerment of *F. pulcherrima*. It is suggested to take measures such as moderately thinning and pruning, strengthening population and habitat protection, actively carrying out artificial breeding and returning population expansion to promote the growth and recovery of the population.
Key words: *Firmiana pulcherrima*, population structure, static life table, survival analysis, time sequence analysis

植物种群生态学主要研究植物种群及其与生境间的相互关系，是植物生态学的重要组成部分（戈峰等，2008）。植物的种群结构与动态特征反映了该种群和所处环境的适配度，是植物长期适应与进化的结果。开展濒危植物种群结构与动态特征研究，有助于了解该种群的数量特征、存活状态、更新繁育能力及种群数量变化趋势等（王飞等，2019），在探究种群濒危机制、发展与演替规律等方面具有重要意义。动态量化分析、静态生命表、生存函数、时间序列预测和谱分析等是研究植物种群结构与动态特征的典型分析方法，被广泛运用于珙桐（徐云飞等，2020）、峨眉含笑（秦爱丽等，2020）、巴山榧树（江波等，2018）等珍稀濒危植物研究中。植物种群结构与动态特征研究结果是有关部门对其开展保护利用工作的科学基础，为合理制定物种保育策略、实施种群复壮等提供依据。

美丽火桐（*Firmiana pulcherrima*）为锦葵科（Malvaceae）梧桐属（*Firmiana*）落叶乔木，是我国特有种和国家 II 级重点保护野生植物（国家林业和草原局，农业农村部，2021）。主要分布于海南吊罗山、尖峰岭等中部山区的低地雨林、山地雨林和山谷溪旁，亦见于广西和云南。美丽火桐花叶不同期，花期时叶片落尽，红色聚伞状圆锥花序着生于枝头，颇具观赏价值。过往因垦荒过度导致美丽火桐生境退化和种群数量减少，已被《中国高等植物受威胁物种名录》（覃海宁等，2017）、《中国生物多样性红色名录—高等植物卷（2020）》（生态环境部，中国科学院，2023）等收录，处于濒危（EN）等级。目前对美丽火桐的研究主要集中在繁育技术（黎国运等，2011a；周亚东等，2013）、资源分布（黎国运等，2011b）、叶绿体基因组和密码子偏好性分析（Wang et al., 2018; 陆奇丰等，2020）等方面，关于其种群结构与动态特征的研究未见报道。吊罗山是美丽火桐的天然分布区之一，在此开展种群生态学研究对该物种的保护和发展具有现实意义。基于此，本研究以吊罗山美丽火桐自然种群为研究对象，采用编制静态生命表、绘制存活曲线、动态量化分析、计算生存函数等方法对野外调查数据进行统计分析，探究了美丽火桐种群结构、动态变化规律、自然更新能力和主要致濒原因等科学问题，明确了美丽火桐种群生存现状和发展趋势，并提出了种群保育和恢复建议。研究结果将为吊罗山美丽火桐种群复壮、群落增长及生境保护等提供科学依据，也为有关国家重点保护野生植物研究应用、生物多样性保护等提供基础参考。

1 研究区概况

研究区设置于海南热带雨林国家公园吊罗山片区（109°45′—110°03′ E、18°43′—18°58′ N），该片区位于海南岛东南部，是中国大陆性岛屿型热带雨林区之一。该区域属于热带海洋性季风气候，终年温热，年平均气温 24.4℃；降雨充沛，年降水量 1 870～2 760 mm，年日照时数 1 676～2 150 h（李晨笛等，2023）。吊罗山成土母岩主要有黑云母花岗岩、花岗斑岩及混合花岗岩类，土壤类型以山地赤红壤和山地黄壤为主，土层深厚，呈酸性，有机质含量较高（张晓琳等，2014；王旭等，2022）。区域内记录有野生维管植物 239 科 959 属 2 127 种；天然分布着坡垒（*Hopea hainanensis*）、闽粤苏铁（*Cycas taiwaniana*）、美花兰（*Cymbidium insigne*）、卷萼兜兰（*Paphiopedilum appletonianum*）4 种国家I级重点保护野生植物，蝴蝶树（*Heritiera parvifolia*）、黑桫椤（*Gymnosphaera podophylla*）、油丹（*Alseodaphnopsis hainanensis*）、山铜材（*Chunia bucklandioide*s）、海南粗榧（*Cephalotaxus hainanensis*）等国家II级重点保护野生植物 92 种。吊罗山主要植被类型有热带低地雨林、山地雨林、季雨林、山顶常绿矮林及灌丛等（谢春平等，2022；李晨笛等，2023）。

2 研究方法

2.1 调查方法

参照周赛霞等（2020）调查方法，在美丽火桐集中分布、群落保存较完整的区域设置 6 个 30 m×30 m 的典型调查样地，每个样地中以 10 m 为间隔，利用全站仪将其划分为 9 个 10 m×10 m 的小样方，合计 54 个调查样方。对样地内胸径（DBH）≥2 cm 的美丽火桐活立木进行测量并记录植株的高度、胸径和冠幅，DBH＜2 cm 的幼苗仅记录株数。同时记录各样地地理坐标、海拔、坡度、坡向等生境信息。各样地基本情况如下表 1 所示。

表 1 调查样地基本情况

Table 1 Basic situation of survey sample

样地 Plot	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude (m)	坡度 Gradient (°)	坡向 Aspect
P1	109°49′54.15″ E	18°42′4.33″ N	468	6	东北 Northeast
P2	109°55′6.69″ E	18°40′0.88″ N	194	5	西南 Southwest
P3	109°53′43.68″ E	18°40′17.72″ N	275	7	北 North
P4	109°53′57.64″ E	18°40′5.32″ N	309	8	南 South
P5	109°53′52.29″ E	18°40′0.96″ N	371	5	北 North
P6	109°52′55.42″ E	18°40′17.01″ N	468	5	东北 Northeast

2.2 龄级划分

基于濒危植物种群数量稀少，及同一树种径级和龄级对相同环境的响应具有一致性的规律（Wu et al., 2010; 雷颖等，2022），应用生态学中常以胸径级代替年龄级开展濒危植物种群动态变化研究。参照江杏香等（2021）对海南濒危植物蕉木（*Chieniodendron hainanense*）和罗文等（2023）对海南极小种群坡垒的径级划分方法，及美丽火桐生活史和径级分布特点，将 DBH＜2 cm 的个体归为第 I 龄级，此后每隔 5 cm 为一个龄级，共将美丽火桐种群划分为 11 个龄级，即 2 cm≤DBH＜7 cm 为第 II 龄级；7 cm≤DBH＜12 cm 为第 III 龄级；12 cm≤DBH＜17 cm 为第 IV 龄级；17 cm≤DBH＜22 cm 为第 V 龄级；22 cm≤DBH＜27 cm 为第 VI 龄级；27 cm≤DBH＜32 cm 为第 VII 龄级；32 cm≤DBH＜37 cm 为第 VIII 龄级；37 cm≤DBH＜42 cm 为第 IX 龄级；42 cm≤DBH＜47 cm 为第 X 龄级；DBH≥47 cm 为第 XI 龄级。依据美丽火桐树种特性，将 11 个龄级归纳为 5 大生长发育阶段，即幼龄（第 I 至第 III 龄级）、中龄（第 IV 至第 V 龄级）、近熟龄（第 VI 至第 VII 龄级）、成熟龄（第 VIII 至第 X 龄级）

和过熟龄（第 XI 龄级）。

2.3 种群结构动态量化分析

吊罗山美丽火桐种群结构动态量化分析参照陈晓德（1998）的方法进行，分别计算种群两个相邻龄级的数量动态变化指数（V_n）、不考虑未来外部环境干扰的整个种群数量动态变化指数（V_{pi}）、考虑未来外部环境干扰时的整个种群数量动态变化指数（V'_{pi}）和种群对完全随机干扰所承担的最大风险概率（P_{max}）。V_n、V_{pi}、V'_{pi}为正值、负值、零时分别反映种群两个相邻龄级个体数量的增长、衰退、稳定的结构动态关系（李先琨等，2002）。

2.4 静态生命表及存活曲线

参照吴律欣等（2020）的方法计算各参数并编制美丽火桐种群静态生命表，使用匀滑技术（杨彪等，2020）对数据进行处理。以龄级为横坐标，以标准化存活数对数（$\ln l_x$）为纵坐标，绘制种群存活曲线（曹羚等，2022）。采用 Hett 和 Loucks（1976）提出的指数函数模型（$N_x=N_0e^{-bx}$）和幂函数模型（$N_x=N_0x^{-b}$）对存活曲线进行拟合，检验美丽火桐种群生存现状是否符合 Deevey-Ⅱ型或 Deevey-Ⅲ型曲线（Edward & Deevey, 1947）。

2.5 种群生存分析

使用生存率（S_i）、累计死亡率（F_i）、死亡密度（f_i）、危险率（λ_i）对美丽火桐种群进行生存分析，并以龄级为横坐标，各生存函数为纵坐标，分别绘制 4 种生存函数曲线，计算公式参照唐凤等（2022）的方法。

2.6 时间序列预测

使用时间序列分析的一次移动平均法，对未来经过 3 个、6 个、9 个龄级时间后的种群数量进行预测，具体计算参照吉也等（2019）的方法进行。

3 结果与分析

3.1 美丽火桐种群年龄结构与动态量化分析

吊罗山美丽火桐种群龄级结构如图 1 所示。调查样地内共有美丽火桐 238 株，种群密度为每平方米 0.044 1 株，其中幼龄（第 I 至第 III 龄级）个体数量最多，占种群个体总数的 62.18%；其次为中龄（第 IV 至第 V 龄级）个体，占种群个体总数的 14.29%；过熟龄（第 XI 龄级）个体数量最少，仅发现 4 株。吊罗山美丽火桐种群年龄结构趋近于下宽上窄的金字塔型，为增长型种群。其林下幼苗数量充足，幼树数量急剧减少，表明美丽火桐虽有较强的萌芽和繁殖能力，但幼苗向幼树过渡阶段存在障碍，强烈的环境筛作用使美丽火桐幼苗难以发育成幼树。

吊罗山美丽火桐种群相邻龄级结构动态量化分析结果如表 2。美丽火桐种群动态指数 V_1、V_4、V_6、V_8、V_9、V_{10}均大于 0，说明种群在 I~II、IV~V、VI~VII、VIII~XI 龄级表现为增长的动态结构关系；而 V_2、V_3、V_5、V_7均小于 0，说明种群在 II~IV、V~VI、VII~VIII 龄级表现为衰退的动态结构关系。种群整体表现出“增长−衰退−增长−衰退−增长−衰退−增长”的动态变化趋势，种群稳定性较差。忽略外部干扰时整个种群结构的数量动态变化指数（V_{pi}）大于考虑外部干扰时整个种群结构的数量动态变化指数（V'_{pi}）且均大于 0，表明吊罗山美丽火桐种群属于增长型种群，这与种群龄级结构分析结果一致。但 V'_{pi}较小且趋近于 0，表明该种群在有外界干扰的情况下增长性较差。种群对完全随机干扰所承担的最大风险概率 P_{max}为 1.82%，表明种群对外界随机干扰有较高敏感度，种群抗干扰能力弱。

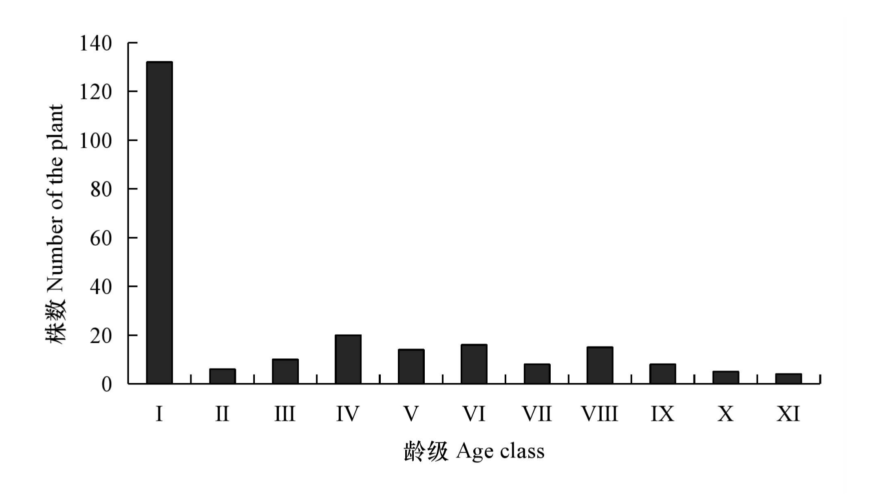


图 1 美丽火桐种群龄级结构

Fig. 1 Age-class structure of *Firmiana pulcherrima* population

表 2 美丽火桐种群数量动态变化指数

Table 2 Number dynamic index of *Firmiana pulcherrima* population

指标 Index	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{pi}	V'_{pi}	P_{max}
值 Value (%)	95.45	-40.00	-50.00	30.00	-12.50	50.00	-46.67	46.67	37.50	20.00	59.02	1.07	1.82

注：V_n 为种群两个相邻龄级的数量动态变化指数；V_{pi} 为忽略外部干扰时整个种群结构的数量动态变化指数；V'_{pi} 为考虑外部干扰时整个种群结构的数量动态变化指数；P_{max} 为种群对完全随机干扰所承担的最大风险概率。

Note: V_n is the number dynamic index of two adjacent age classes of the population; V_{pi} is the number dynamic index of entire population structure when ignoring external interference; V'_{pi} is the number dynamic index of entire population structure when considering external interference; P_{max} is the maximum risk probability of population to completely random disturbance.

3.2 美丽火桐种群静态生命表与存活曲线

吊罗山美丽火桐种群静态生命表（表 3）结果显示，随龄级增加，种群现有个体数（A_x）和标准化存活个体数（l_x）总体均呈下降趋势。该种群死亡率（q_x）和消失率（K_x）在第 I 龄级达到最大值，这与美丽火桐幼苗向幼树发育过程中的高死亡率相对应；死亡率和消失率均在第 II 龄级急剧减小，随后均随龄级的增加呈先增后减的动态变化趋势，均在第 IX 龄级达到第二个峰值后下降，此为个体达到生理年龄后逐渐死亡导致的，符合其生物学特性。种群生命期望(e_x)总体呈先升后降的变化趋势，生命期望在第 II 龄级急剧升高至最大值(5.31)，后随龄级增加逐渐减小，至第 XI 龄级降至最小值（0.50）。

由图 2 可知，美丽火桐种群标准化存活数对数（lnl_x）随龄级增加而减少，第 I 至第 II 龄级存活曲线斜率大，表明该阶段死亡率增加，个体存活数减少；第 II 至第 IX 龄级存活曲线斜率较小，即该阶段各龄级死亡率相当；第 IX 至第 XI 龄级存活曲线斜率增大，死亡率增加。美丽火桐种群存活曲线拟合结果如表 4，指数函数模型和幂函数模型的拟合结果均达到极显著水平（P＜0.01），但幂方程的 R^2 值和 F 值均大于指数方程，表明幂方程拟合效果最优，美丽火桐种群存活曲线符合 Deevey-III 型曲线。

表 3 美丽火桐种群静态生命表

Table 3 Static life table of *Firmiana pulcherrima* population

龄级 Age class	胸径级 DBH (cm)	A_x	a_x	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x	S_x
I	DBH＜2	132	132	1 000	6.91	841	0.84	580	1424	1.42	1.84	0.16
II	2≤DBH＜7	6	21	159	5.07	15	0.10	152	845	5.31	0.10	0.90
III	7≤DBH＜12	10	19	144	4.97	15	0.11	136	693	4.82	0.11	0.89
IV	12≤DBH＜17	20	17	129	4.86	15	0.12	121	557	4.32	0.13	0.88
V	17≤DBH＜22	14	15	114	4.73	15	0.13	106	436	3.83	0.14	0.87
VI	22≤DBH＜27	16	13	98	4.59	15	0.15	91	330	3.35	0.17	0.85
VII	27≤DBH＜32	8	11	83	4.42	15	0.18	76	239	2.86	0.20	0.82
VIII	32≤DBH＜37	15	9	68	4.22	8	0.11	64	163	2.39	0.12	0.89
IX	37≤DBH＜42	8	8	61	4.10	23	0.38	49	98	1.63	0.47	0.63
X	42≤DBH＜47	5	5	38	3.63	8	0.20	34	49	1.30	0.22	0.80
XI	DBH≥47	4	4	30	3.41	—	—	15	15	0.50	—	—

注：A_x为 x 龄级现有个体数；a_x为 A_x匀滑后 x 龄级的存活个体数；l_x为标准化存活个体数；$\ln l_x$为标准化存活数对数；d_x为 x 到 x+1 龄级间隔期内标准化死亡数；q_x为死亡率；L_x为 x 到 x+1 龄级间隔期的存活个体数；T_x为 x 龄级到超过 x 龄级的个体总数；e_x为生命期望；K_x为消失率；S_x为存活率。

Note: A_x is individual number of age class x; a_x is the number of surviving individuals of x age class after A_x smooth sliding; l_x is the standardized number of surviving individuals; $\ln l_x$ is the logarithm of standardized survival number; d_x is standardized number of deaths during the interval between age class x to x+1; q_x is mortality; L_x is number of surviving individuals between age class x to x+1; T_x is total number of individuals age class x to over x; e_x is life expectancy; K_x is vanish rate; S_x is survival rate.

表 4 美丽火桐种群存活曲线检验模型

Table 4 Test models of survival curves of *Firmiana pulcherrima* population

存活曲线 Survival curve	拟合模型 Fitting model	拟合结果 Fitting results	R^2	*F*	*P*
Deevey-II	$N_x=N_0e^{-bx}$	$N_x=6.241e^{-0.05x}$	0.867	58.965	0.000
Deevey-III	$N_x=N_0x^{-b}$	$N_x=6.641x^{-0.23}$	0.892	74.445	0.000

注：N_x为匀滑后 x 龄级内存活数；N_0为种群形成初期的个体存活数。

Note: N_x is survival within age class x after smooth sliding; N_0 is the number of individuals surviving in the early stages of population formation.

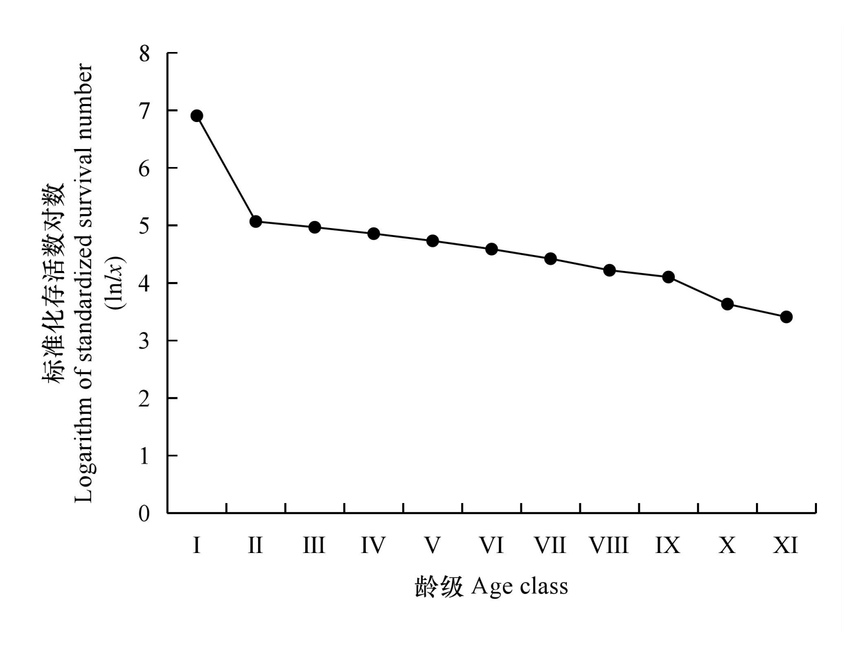


图 2 美丽火桐种群存活曲线

Fig. 2 Survival curve of *Firmiana pulcherrima* population

3.3 美丽火桐种群生存分析

美丽火桐种群生存率、累计死亡率、死亡密度及危险率的生存函数曲线如图 3 和图 4 所示。随龄级增加种群生存率单调递减，至第 XI 龄级达到最小值；累计死亡率则单调递增，至第 XI 龄级达到最大值，各龄级种群生存率均远低于累计死亡率。种群死亡密度在第 I 龄级有最大值，向第 II 龄级过渡时急剧减小，后随龄级增加总体呈下降趋势并趋近于 0，表明幼龄个体有较高死亡率，但种群在中后期生长中面临的死亡风险较低。种群危险率随龄级增加则呈“降-升-降-升-降-升”的变化趋势，分别在第 I、VII、IX、XI 龄级出现峰值；第 II 至第 VIII 龄级的危险率保持在较低水平且小于对应龄级的生存率，表明该阶段种群发展较为稳定。综合分析上述四种生存函数可知，吊罗山美丽火桐种群发展整体表现出早期锐减、中后期趋于稳定的特点。

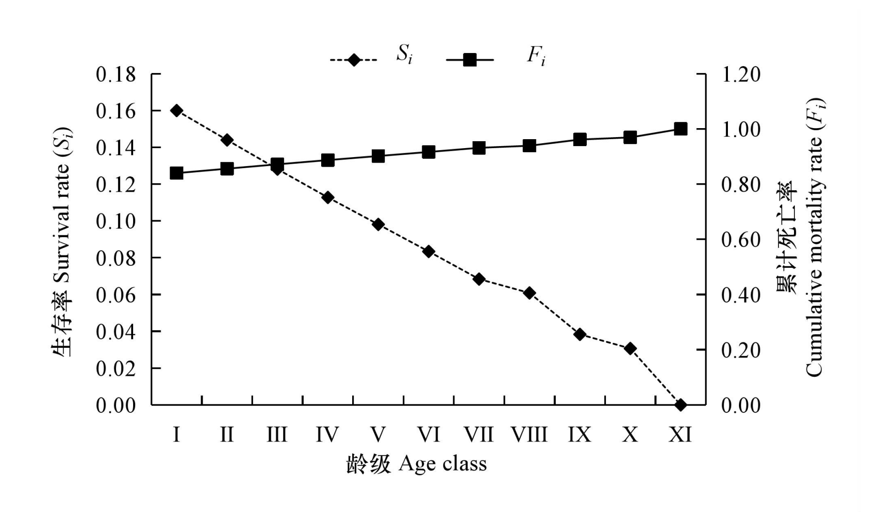


图 3 美丽火桐种群生存率和累计死亡率曲线

Fig.3 Survival rate and cumulative mortality rate of *Firmiana pulcherrima* population

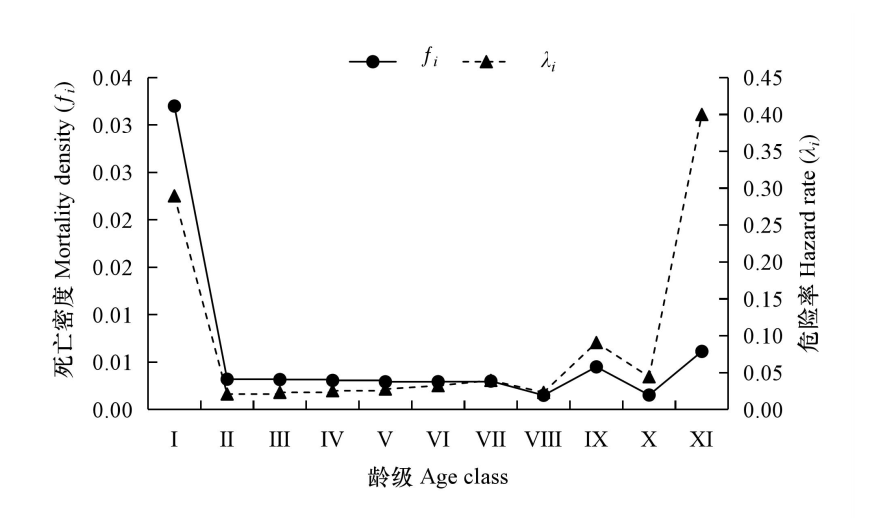


图 4 美丽火桐种群死亡密度和危险率曲线

Fig.4 Mortality density and hazard rate of *Firmiana pulcherrima* population

3.4 美丽火桐时间序列预测

以吊罗山美丽火桐种群各龄级原始数据为基础，采用一次移动平均法预测各龄级经过 3 个、6 个、9 个龄级时间后的个体数量，结果如表 5 所示。经过 3 个、6 个、9 个龄级时间后，各龄级个体数总体呈上升趋势。经过未来 3 个龄级时间后，除第 IV 和第 VIII 龄级外，美丽火桐种群各龄级个体数均有增多，其中第 III 龄级个体数较原始数据增幅达到 390.00%。经过未来 6 个龄级时间后，除第 VII 龄级外，第 VI 和第 VIII 至第 XI 龄级个体数较 $M_3^{(1)}$分别增加 94.12%、7.69%、40.00%、22.22%和 50.00%。经过未来 9 个龄级时间后，第 IX 和第 XI 龄级个体数较 $M_6^{(1)}$分别增加 78.57%和 22.22%。表明吊罗山美丽火桐种群幼、中龄个体相对丰富，随时间的增加可对种群中具有较强繁殖能力的近熟龄和成熟龄个体进行补充，种群发展趋于稳定。

表 5 美丽火桐种群数量动态变化时间序列分析

Table 5 Time sequence analysis on dynamic change of population quantity of *Firmiana pulcherrima*

龄级 Age class	原始数据 Primary data	$M_3^{(1)}$	$M_6^{(1)}$	$M_9^{(1)}$
I	132	—	—	—
II	6	—	—	—
III	10	49	—	—
IV	20	12	—	—
V	14	15	—	—
VI	16	17	33	—
VII	8	13	12	—
VIII	15	13	14	—
IX	8	10	14	25
X	5	9	11	11
XI	4	6	9	11

注：$M_t^{(1)}$为经过 3 个、6 个、9 个龄级时间后 t 龄级的种群大小。

Note: $M_t^{(1)}$ indicates the population size at age t after the next 3, 6 and 9 age class.

4 讨论与结论

4.1 美丽火桐种群结构特征

构成植物种群结构的基本要素包括数量、密度、年龄和性别比例等，其中年龄结构反映了种群内部不同龄级个体的数量分布情况和该物种对当前生境的适应程度(段昌群等，2020)。对珍稀濒危植物的年龄结构进行研究有助于了解该物种种群消长规律和未来发展趋势，因此本文采用胸径级代替年龄级的方法，对吊罗山濒危植物美丽火桐年龄结构进行研究。结果表明，吊罗山现存美丽火桐种群为增长型种群，与其相邻龄级动态量化分析结果一致。但种群抗干扰能力弱，增长性差，部分龄级间存在衰退现象，尤其是幼苗向幼树发育阶段存在增补限制，该限制可能与美丽火桐生物学特性及幼苗的分布方式有关。一方面，美丽火桐是喜光的阳性树种（黎国运等，2011b），其幼苗生长发育对光照的需求较大，而吊罗山美丽火桐自然群落郁闭度均高于 0.60，因此林下光照不足成为限制美丽火桐幼苗生长的因素之一。另一方面，美丽火桐林下虽有较多实生幼苗，但多为聚集式分布，该分布模式下幼苗的种内竞争作用强烈，幼苗死亡率高，出现自疏现象。雷颖等（2022）的研究也发现桢楠（*Phoebe zhennan*）幼苗的集群分布加剧了幼苗间的种内竞争，使幼苗死亡率升高。

4.2 美丽火桐种群动态变化规律

辅以匀滑技术编制的静态生命表能够反映在特定时间下某一物种多世代重叠的年龄动态（吴其超等，2021），生存分析和时间序列预测可辅助静态生命表阐述种群生存规律（张兴旺等，2023），上述方法均在分析濒危植物种群生存现状和更新策略、判断种群发展趋势中发挥重要作用。美丽火桐种群死亡率（q_x）和消失率（K_x）最大值均出现在第 I 龄级，与上文中的幼苗死亡率高有关；至第 II 龄级均急剧减小，生命期望（e_x）则急剧上升至最大值，表明经过第 I 龄级剧烈的环境筛作用后，美丽火桐对环境的适应能力得以提升，此时个体生存能力最强。此后 e_x 随龄级增加不断减小，q_x 和 K_x 在第 III 至第 VIII 龄级始终保持在较低水平，均至第 IX 龄级达到第二峰值。该峰值形成的原因可能是美丽火桐到达成熟龄后，与群落中红花天料木（*Homalium hainanense*）、囊瓣木（*Miliusa horsfieldii*）等其他高大乔木争夺养分资源，种间竞争作用增强，导致占据生态位下层的被压木逐渐死亡，林分出现自疏现象（袁志忠等，2004）。吊罗山美丽火桐种群存活曲线与雅砻江冬麻豆（*Salweenia bouffordiana*）种群（杨彪等，2020）、台湾水青冈（*Fagus hayatae*）种群（李金昕等，2016）一致，均为 Deevey-III 型曲线，上述种群均具有早期锐减、中后期趋于稳定的特点。种群早期死亡率高可能是幼龄植株生存力弱、激烈的种内种间竞争等因素共同导致，研究证实树木死亡由竞争驱动的表现是小径级树木死亡率高于大径级树木（Coomes et al., 2018; 吴律欣等，2020）。

4.3 美丽火桐种群未来发展趋势

时间序列预测结果表明在经过未来 3 个、6 个、9 个龄级时间后，吊罗山美丽火桐种群个体数逐渐增多（第 IV 和第 VIII 龄级除外），其中第 III、第 IX 和第 XI 龄级的增长量较大，龄级更替正常，种群出现衰退的风险较小。这与尕海-则岔地区紫果云杉（*Picea purpurea*）种群（赵阳等，2018）、藏东南高山松（*Pinus densata*）种群（卢杰等，2013）的未来发展趋势一致，丰富的幼苗储备为上述种群的短期繁衍奠定基础。但仍需警惕幼苗的低存活率和低抗干扰能力对种群长期延续的不利影响，幼苗向幼树发展的低转换率将导致种群幼树个体不断减少，进而导致中龄、近熟龄等其他龄级个体的补充受限，长此以往或将出现龄级断层，使种群自然更新困难，导致种群衰退。此外调查还发现吊罗山部分美丽火桐植株分布于栈道边、路旁等人类活动频繁的区域，而人为干扰将对植物种子萌发和幼苗定居产生不利影响（赵阳等，2018），因此还需在保护管理过程中减弱外部因素对种群发展的影响。

4.4 美丽火桐濒危原因及保护建议

美丽火桐是中国特有的珍稀濒危野生植物，具有极高的观赏价值，吊罗山是美丽火桐的原生分布地之一，对其种群生存现状进行研究的结果表明，强烈的光环境筛和种内种间竞争是导致吊罗山美丽火桐濒危的主要原因，其他生殖或生态特性的致濒因素有待进一步研究。因此加强对美丽火桐的生境保护、减小环境阻力、提高幼苗保存率是保持该种群稳定和促进种群增长的关键环节。本文根据吊罗山美丽火桐的种群现状特点，提出资源保护建议：（1）强化现有种群及其原生境的保护与管理，在集中分布地建立自然保护小区，加强巡护和监管，防止过度人为干扰对幼苗及其生境造成损害。（2）适当进行人工干预，通过人工间苗或移栽，减弱幼苗种内竞争，促进幼苗存活；辅以修枝措施，改善林内光环境，增加大树枝下高，释放幼苗及幼树生长空间。（3）积极开展人工繁育，并在适宜区域开展迁地保护、近地保护和回归定植等保护行动，人为扩充种群及个体数量，为其植物资源保护和利用奠定物质基础；同时可在造林绿化工程中推广种植，使其在利用中得到保护（邹天才等，2021）。（4）围绕美丽火桐开展植物学、生态学和生理学等基础科学研究，解析个体和种群生长发育规律，揭示其物种濒危机制，为有关生物多样性保护和利用提供科学基础。

参考文献：

CHEN XD, 1998. A Study on the method of quantitative analysis for plant population and community structural dynamics[J]. Acta Ecol Sin, 18(2): 214-217. [陈晓德，1998．植物种群与群落结构动态量化分析方法研究[J]．生态学报，18（2）：214-217．]

CAO L, YEERJIANG BT, CHE C, et al., 2022. Age structure and dynamic characteristics of *Malus sieversii* in Emin County[J]. J SW For Univ (Nat Sci Ed), 42(6): 71-79. [曹羚，叶尔江·拜克吐尔汉，车畅，等，2022．额敏新疆野苹果种群年龄结构与动态特征[J]．西南林业大学学报（自然科学版），42（6）：71-79．]

COOMES DA, ŠAFKA D, SHEPHERD J, et al., 2018. Airborne laser scanning of natural forests in New Zealand reveals the influences of wind on forest carbon[J]. For Ecosyst, 5(2): 126-139.

DUAN CQ, SU WH, YANG SH, et al., 2020. Plant ecology[M]. Beijing: Higher Education Press: 167-168. [段昌群，苏文华，杨树华，等，2020．植物生态学[M]．北京：高等教育出版社：167-168.]

EDWARD S, DEEVEY J, 1947. Life tables for natural populations of animals[J]. Quart Rev Biol, 22(4): 283-314.

GE F, LI DM, WANG DH, et al., 2008. Modern ecology[M]. Beijing: Science Press: 253. [戈峰，李典谟，王德华，等，2008．现代生态学[M]．北京：科学出版社：253.]

HETT JM, LOUCKS OL, 1976. Age structure models of balsam fir and eastern hemlock[J]. J Ecol, 64(3): 1029-1044.

JIANG B, ZHOU XR, SHANG J, et al., 2018. Population structure and dynamics of *Torreya fargesii* Franch., a plant endemic to China[J]. Acta Ecol Sin, 38(3): 1016-1027. [江波，周先容，尚进，等，2018．中国特有植物巴山榧树的种群结构与动态[J]．生态学报，38（3）：1016-1027．]

JIANG XX, CHEN YK, WU SS, et al., 2021. Population structure and dynamics of the endangered plant *Chieniodendron hainanense* in Hainan[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 45(1): 116-122. [江杏香，陈玉凯，吴石松，等，2021．海南濒危植物蕉木种群结构与动态特征[J]．南京林业大学学报（自然科学版），45（1）：116-122．]

JI Y, CAO MY, BAI CF, et al., 2019. Population structure and dynamics of *Alsophila spinulosa* in Mount Emei[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 39(3): 543-551. [吉也，曹孟岩，白楚锋，等，

2019．峨眉山桫椤种群结构与动态特征[J]．西北植物学报，39（3）：543-551．]

LI GY, GUAN XJ, SHENG XB, 2011a. Research on shoot cutting propagation of *Firmiana pulcherrima* Hsue[J]. Trop For, 39(4): 36-38. [黎国运，关秀娟，盛小彬，2011a．美丽梧桐扦插育苗技术研究[J]．热带林业，39（4）：36-38．]

LI GY, SHENG XB, XU PL, 2011b. A preliminary report on wild resource survey of *Firmiana pulcherrima*[J]. Trop For, 39(1): 50-52. [黎国运，盛小彬，徐佩玲，2011b．美丽梧桐野生资源调查初报[J]．热带林业，39（1）：50-52．]

LU QF, LUO WH, HUANG ZH, et al., 2020. Codon usage bias of chloroplast genome from two species of *Firmiana* Marsili[J]. Guihaia, 40(2): 173-183. [陆奇丰，骆文华，黄至欢，等，2020．两种梧桐叶绿体基因组密码子使用偏性分析[J]．广西植物，40（2）：173-183．]

LI CD, LIANG YW, YANG XB, et al., 2023. Altitude distribution pattern of species diversity in tropical natural forest in Diaoluo Mountain[J]. Guihaia, 43(5): 912-922. [李晨笛，梁宜文，杨小波，等，2023．吊罗山热带天然林物种多样性的海拔分布格局[J]．广西植物，43（5）：912-922．]

LI XK, SU ZM, XIANG WS, et al., 2002. Study on the structure and spatial pattern of the endangered plant population of *Abies yuanbaoshanensis*[J]. Acta Ecol Sin, 22(12): 2246-2253. [李先琨，苏宗明，向悟生，等，2002．濒危植物元宝山冷杉种群结构与分布格局[J]．生态学报，22（12）：2246-2253．]

LI JX, WU DJ, ZHANG SP, et al., 2016. Life table and dynamic analysis of *Fagus hayatae* population in Micangshan Nature Reserve, Sichuan Province, China[J]. Acta Ecol Sin, 36(1): 68-74. [李金昕，吴定军，章世鹏，等，2016．四川米仓山自然保护区台湾水青冈种群生命表及动态分析[J]．植物研究，36（1）：68-74．]

LEI Y, HE XN, WANG JM, et al., 2022. Population structure and dynamic characteristics of *Phoebe zhennan* S. Lee in karst areas of Chongqing[J]. Acta Ecol Sin, 42(12): 4903-4911. [雷颖，何雪娜，王佳敏，等，2022．重庆喀斯特生境中桢楠种群结构与动态特征[J]．生态学报，42（12）：4903-4911．]

LUO W, XU H, LI YP, et al., 2023. Population structure and quantitative dynamics of a wild plant with extremely small populations *Hopea hainanensis*[J]. For Res, 36(2): 169-177. [罗文，许涵，李艳鹏，等，2023．极小种群野生植物坡垒的种群结构与数量动态研究[J]．林业科学研究，36（2）：169-177．]

LU J, GUO QQ, ZHENG WL, et al., 2013. Population structure and dynamic characteristics of *Pinus densata* in southeast Tibet[J]. Sci Silv Sin, 49(8): 154-160. [卢杰，郭其强，郑维列，等，2013．藏东南高山松种群结构及动态特征[J]．林业科学，49（8）：154-160．]

Ministry of Ecology and Environment, Chinese Academy of Sciences, 2023. Announcement on the release of ‘China Biodiversity Red List - Vertebrate Volume (2020)’ and ‘China Biodiversity Red List-Higher Plant Volume (2020)’ [EB/OL]. [2024-1-8]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/ xxgk/xxgk01/ 202305/t20230522_1030745.html. [生态环境部，中国科学院，2023．关于发布《中国生物多样性红色名录-脊椎动物卷（2020）》和《中国生物多样性红色名录-高等植物卷（2020）》的公告[EB/OL].[2024-1-8]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202305/t20230522_1030745.html.]

QIN AL, MA FQ, XU GX, et al., 2020. Population structure and dynamic characteristics of a rare and endangered tree species *Michelia wilsonii* Finet et Gagn[J]. Acta Ecol Sin, 40(13): 4445-4454. [秦爱丽，马凡强，许格希，等，2020．珍稀濒危树种峨眉含笑种群结构与动态特征[J]．生态学报，40（13）：4445-4454．]

QIN HN, YANG Y, DONG SY, et al., 2017. Threatened species list of China's higher plants[J]. Biodivers Sci, 25(7): 696-744. [覃海宁，杨永，董仕勇，等，2017．中国高等植物受威胁物种名录[J]．生物多样性，25（7）：696-744．]

State Forestry and Grassland Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, 2021. List of national key protected wild plants[EB/OL]. [2024-1-8]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/09/content_5636409.htm. [国家林业和草原局，农业农村部，2021．国家重点保护野生植物名录[EB/OL]． [2024-1-8]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/09/content_5636409.htm.]

TANG F, ZHOU TC, YANG NK, et al., 2022. Population structure and dynamics analysis of rare and endangered plant *Camellia kweichowensis*[J]. Guihaia, 42(3): 520-529. [唐凤，邹天才，杨乃坤，等，2022．稀有濒危植物贵州红山茶种群结构及数量动态变化的研究[J]．广西植物，42（3）：520-529．]

WANG F, HUO HC, ZHAO Y, et al., 2019. Population structure and dynamics of original *Abies faxoniana* Rehd—*Rhododendron simsii* Planch in high-mountain timberline of Southern Gansu Province[J]. Bull Botan Res, 39(5): 664-672. [王飞，霍怀成，赵阳，等，2019．甘南高山林线岷江冷杉—杜鹃种群结构与动态[J]．植物研究，39（5）：664-672．]

WANG X, HAN TY, RUAN LP, et al., 2022. Effects of buttressed roots on soil physical and chemical properties of soil in lowland rainforests of Diaoluoshan, Hainan, China[J]. Chin J Appl Environ Biol, 28(3): 751-758. [王旭，韩天宇，阮璐坪，等，2022．板根对海南岛吊罗山热带低地雨林土壤理化性质的影响[J]．应用与环境生物学报，28（3）：751-758．]

WU LX, YANG XB, LI DH, et al., 2020. Population structure and dynamics of *Schefflera octophylla* in Tongguling, Hainan Province[J]. Guihaia, 40(8): 1101-1110. [吴律欣，杨小波，李东海，等，2020. 海南铜鼓岭鸭脚木种群动态特征研究[J]. 广西植物，40（8）：1101-1110.]

WU QC, ZANG FQ, LI CC, et al., 2021. Population structure and dynamics of endangered *Populus wulianensis*[J]. Acta Ecol Sin, 41(12): 5016-5025. [吴其超，臧凤岐，李呈呈，等，2021．濒危树种五莲杨种群结构与动态特征[J]．生态学报，41（12）：5016-5025．]

WANG JH, CAI YC, ZHAO KK, 2018. Characterization of the complete chloroplast genome sequence of *Firmiana pulcherrima* (Malvaceae) [J]. Conserv Genet Resour, 10(3): 445-448.

WU JX, ZHANG XM, DENG CZ, et al., 2010. Characteristics and dynamics analysis of *Populus euphratica* populations in the middle reaches of Tarim River[J]. J Arid Land, 2(4): 250-256.

XIE CP, WANG CL, WANG HH, et al., 2022. Population structure and dynamics characteristics of *Alsophila spinulosa* in Diaoluo mountain tropic rain forest of Hainan[J]. J Xinyang Norm Univ (Nat Sci Ed), 35(4): 566-575. [谢春平，王常玲，王候河，等，2022．海南吊罗山热带雨林桫椤种群结构与动态特征[J]．信阳师范学院学报（自然科学版），35（4）：566-575.]

XU YF, LIU JS, XU WJ, et al., 2020. Differences in population structure and dynamic characteristics of *Davidia involucrata* Baill. between high and low latitude regions[J]. Bull Bot Res, 40(6): 855-866. [徐云飞，刘沁松，徐文娟，等，2020．天然珙桐种群结构与动态特征在高低纬度地区的差异[J]．植物研究，40（6）：855-866．]

YANG B, ZHANG QJ, GONG X, et al., 2020. Population structure and dynamic characteristics of *Salweenia bouffordiana*[J]. Acta Ecol Sin, 40(4): 1184-1194. [杨彪，张全建，龚旭，等，2020. 雅砻江冬麻豆（*Salweenia bouffordiana*）种群结构与动态特征[J]．生态学报，40（4）：1184-1194．]

YUAN ZZ, BAO WK, HE BH, 2004. Life table and survival analysis of *Cupressus chengiana* population in the western of Sichuan, China[J]. Acta Bot Yunnan, 26(4): 373-381. [袁志忠，包

维楷，何丙辉，2004．川西地区岷江柏种群生命表与生存分析[J]．云南植物研究，26（4）：373-381．]
ZHOU YD, ZHOU YB, YAN SL, et al., 2013. Effects of different substrates on seed germination and seedling growth of *Firmiana pulcherrima* Hsue[J]. J Trop Biol, 4(4): 322-326. [周亚东，周有标，颜速亮，等，2013．不同基质对美丽梧桐种子育苗的影响[J]．热带生物学报，4（4）：322-326．]
ZHOU SX, PENG YS, ZHAN XH, et al., 2020. Population structure and numeric dynamics of *Pinus taiwanensis* in Lushan Mountain of Jiangxi Province[J]. Guihaia, 40(2): 247-254. [周赛霞，彭焱松，詹选怀，等，2020．庐山黄山松种群结构及数量动态研究[J]．广西植物，40（2）：247-254．]
ZHANG XL, WANG S, WANG X, et al., 2014. Soil organic carbon storage of Diaoluoshan Natural Reserve in Hainan[J]. Chin J Trop Crop, 35(2): 362-368. [张晓琳，王帅，王旭，等，2014．海南吊罗山自然保护区土壤有机碳贮量研究[J]．热带作物学报，35（2）：362-368．]
ZHANG XW, XIE YP, WU XM, et al., 2023. Population structure and dynamic characteristics of wild plant species with extremely small populations of *Camptotheca acuminata* in Mingxi, Fujian Province, China[J]. Ecol Environ Sci, 32(6): 1037-1044. [张兴旺，谢艳萍，吴晓敏，等，2023．福建省明溪县极小种群野生植物喜树种群结构与动态特征[J]．生态环境学报，32（6）：1037-1044．]
ZHAO Y, QI R, JIAO J, et al., 2018. The population structure and dynamic characteristics of *Picea purpurea* at the Gahai-zecha area[J]. Acta Ecol Sin, 38(20): 7447-7457. [赵阳，齐瑞，焦健，等，2018．尕海-则岔地区紫果云杉种群结构与动态特征[J]．生态学报，38（20）：7447-7457．]
ZHOU TC, LI YY, HONG J, et al., 2021. Species diversity conservation and utilization of Guizhou rare and endangered spermatophyta[J]. Guihaia, 41(10): 1699-1706. [邹天才，李媛媛，洪江，等，2021．贵州稀有濒危种子植物物种多样性保护与利用的研究[J]．广西植物，41（10）：1699-1706．]